

小口径低压低流量管道电磁涡流内检测应用

李林林¹, 薛巨富², 孟鑫港¹, 张天龙³, 韩晓刚¹

¹国家管网集团储能技术公司中原储气库有限责任公司, 河南 濮阳

²中石油煤层气有限责任公司临汾分公司, 山西 临汾

³国家管网集团西北公司山西输油气分公司, 山西 太原

收稿日期: 2025年7月30日; 录用日期: 2025年9月16日; 发布日期: 2025年9月30日

摘要

油气管道长期在地下运行, 会因为受到腐蚀破坏, 产生泄露的风险, 需要定期进行内检测, 根据内检测结果进行相应的维护维修措施, 确保管道安全运行。但是有些小口径管道输送流量与运行压力较低, 且存在小半径弯头, 不具备进行漏磁、超声内检测的条件, 文中简单介绍了涡流检测原理, 以及差分探头涡流检测器技术原理, 并以差分探头涡流检测器在某小口径低压低流量管道中的运用为例, 展示电磁涡流检测器检测小口径低压低流量管道的内检测, 并开挖验证, 其检测精度符合标准要求, 差分涡流检测器在该管道的运用为小口径管道的内检测提供了一种解决方法。

关键词

小口径, 低压低流量, 差分涡流检测器

Application of Electromagnetic Eddy Current Internal Inspection in Small-Diameter, Low-Pressure and Low-Flow Pipelines

Linlin Li¹, Jufu Xue², Xingang Meng¹, Tianlong Zhang³, Xiaogang Han¹

¹State Grid Corporation Zhongyuan Gas Storage Co. Ltd., Puyang Henan

²China Petroleum and Chemical Corporation Linfen Coalbed Methane Branch, Linfen Shanxi

³China Oil & Gas Pipeline Network Corporation, Taiyuan Shanxi

Received: Jul. 30th, 2025; accepted: Sep. 16th, 2025; published: Sep. 30th, 2025

Abstract

Oil and gas pipelines run underground for a long time and may be damaged by corrosion, which may lead to leakage risks. The pipeline requires regular internal inspections, and corresponding maintenance.

文章引用: 李林林, 薛巨富, 孟鑫港, 张天龙, 韩晓刚. 小口径低压低流量管道电磁涡流内检测应用[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(3): 561-567. DOI: 10.12677/jogt.2025.473062

nance or repair measures should be implemented based on the inspection results to ensure its safe operation. However, some small-diameter pipelines have low flow and operating pressure and small radius elbows, which do not meet the conditions for magnetic flux leakage and ultrasonic internal detection. This paper briefly introduces the principle of eddy current detection, and the theory of eddy current detection with differential coil sensor, This paper takes the application of eddy current detector with differential coil modle in a small-diameter, low-pressure and low-flow pipeline as an example to demonstrate the internal detection method of electromagnetic eddy current detector for small-diameter, low-pressure and low-flow pipelines. The detection accuracy is verified and meet the standard requirements through excavation. The application of eddy current detector with differential coil sensor in this pipeline provides a solution for the internal detection of small-diameter pipelines.

Keywords

Small Diameter, Low Pressure and Low Flow, The Eddy Current Detection with Differential Coil Sensor

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着管道运行年限的增加,管道面临因腐蚀造成的事故风险逐年递增,管道应定期进行“全面体检”[1],但是有些小口径管道运行压力和输送流量都很低,且存在1.5D弯头,常规的内检测器(几何变形检测器、漏磁检测器、超声检测器等)结构复杂,卡球风险高,检测成本高,且检测条件苛刻(对流量、压力等要求较高,需要较大的启动压差)[2]。对于这些管道外部腐蚀及风险可通过外部检测手段来获取数据,内部腐蚀及风险需积极探索新的解决方案。目前国内涡流检测技术愈渐成熟,已成功运用在多个复杂工况管道。涡流检测器具有体积小、重量轻的优点,可尝试用于此类小口径、低压低流量管道[3]。

2. 涡流检测原理

涡流检测是一种基于电磁感应原理的内检测方法,检测探头由激励线圈和接收线圈组成,在激励线圈中通以交流电,变化的电流电感生出变化磁场,当激励线圈靠近金属导体时,会在导体表面感应生成漩涡状的电流,称为涡流[4],当导体表面存在缺陷时,感应生成的电流也会相应产生变化,通过分析检测线圈接收到的信号强弱与形状可以量化缺陷大小、识别缺陷类型[5]-[7],涡流的检测原理[8]见图1。

传统涡流传感器一般体积较大,且易受管材均匀性、检测环境等的影响,因此在传统涡流检测器的基础上开发了差分探头涡流检测器[9][10],利用差分矩形结构做激励线圈,大大提高涡流抗干扰能力,提高了检测灵敏度,其等效电路见图2。

3. 工程实际运用

3.1. 背景

某管道规格为 $\Phi 219 \times 5.6/6.4$ mm,管道全长23.2 km,输送介质为天然气,管道运行压力为0.7 MPa,数量为 2.4×10^4 方/天,因其流量及运行压力太小,管道不具备进行漏磁及超声内检测的条件,从2014年11月投产以来,管道运行10年,从未进行内检测,管道内部腐蚀状况及变形情况不明,管道安全存在较大风险,为了保障管道的安全运行、识别管道面临的风险,亟需进行管道内检测以便采取相应的维护维

修措施，保障人民生命财产安全。

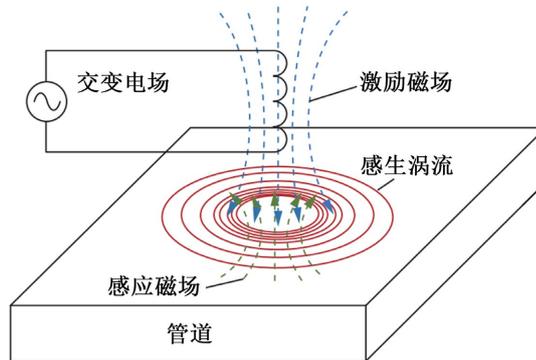


Figure 1. Schematic diagram of eddy current testing principle
图 1. 涡流检测原理

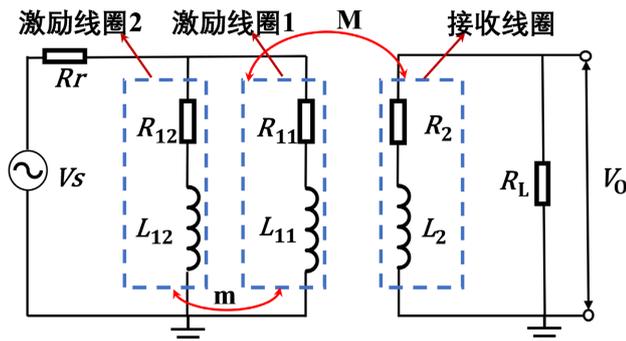


Figure 2. Differential coil equivalent circuit
图 2. 差分耦合线圈等效电路

经过多次调研，选择国内某公司差分涡流检测设备进行本次内检测试验。内检测公司通过对现场管道调研、反复研讨，针对该管道低流量、管道变形不明的情况制定了以下计划：

1) 定制了有高变形性支撑结构的检测器、改变了原有检测器核心结构，从而缩短检测器刚性长度，如图 3；

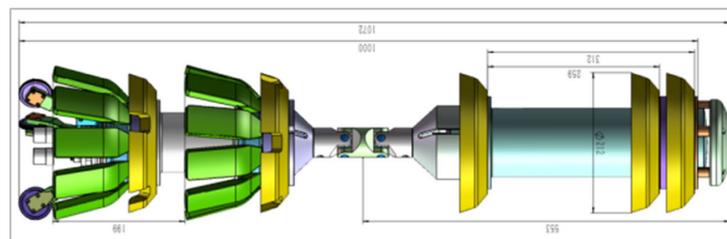


Figure 3. Customized detector design diagram
图 3. 定制化检测器设计图

2) 为了满足续航，增加电池节，同时为了保证检测器通过较小弯头的能力，选择了双节结构设计，中间使用万向轴连接，既保证了检测器的小弯头通过能力，又保障了续航；

3) 为了适配管道低压低流量的工况，最大化减轻了检测器重量，使其在更小的压差下运行；

经过多次方案评审及可行性分析，于 2024 年 2 月对该管道进行了清管及涡流检测，在 0.15 MPa 压

差下, 涡流检测器开始运行, 共运行 8 小时 42 分, 平均运行速度为 0.74 m/s, 检测器收到后, 结构完整, 皮碗和探头表面有明显划痕, 如图 4, 清出污沙 0.3 kg。



Figure 4. Detector status after receiving

图 4. 检测器收球后状态

3.2. 检测结果

通过本次检测, 共计检测出内部金属损失 1228 处, 最深的内部金属损失深度为 31.3%wt, 内部金属损失深度统计分布见表 1; 共检出凹陷 10 处, 最深的凹陷深度为 2.1% OD, 内部金属损失在里程及周向上的分布如图 5。内部金属损失在管道底部有明显集中趋势, 为管道内腐蚀的可能性较大。

Table 1. Internal metal loss statistics table

表 1. 内部金属损失统计表

缺陷深度范围(%wt)	数量/处	比例
$10\% \leq ML < 20\%$	1215	98.94%
$20\% \leq ML < 30\%$	12	0.98%
$30\% \leq ML < 40\%$	1	0.08%
合计	1228	100.00%

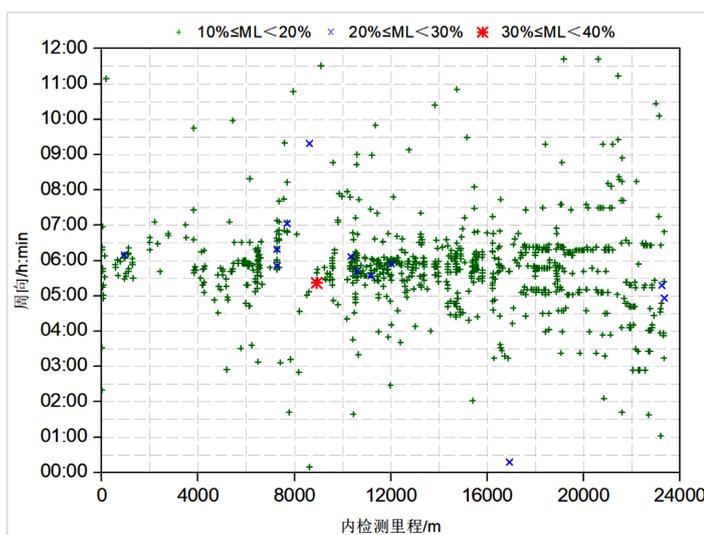


Figure 5. Internal metal loss distribution vs. mileage and orientation

图 5. 内部金属损失在里程及周向上的分布

3.3. 开挖验证

为验证数据的准确性, 全线选取 4 处缺陷点进行开挖验证(3 处金属损失、1 处凹陷), 采用超声测厚、X 射线、深度规分别对 4 处缺陷进行深度测量; 本次涡流内检测环焊缝定位误差不超过 ± 0.7 m, 缺陷距环焊缝距离误差不超过 ± 0.1 m, 内部金属损失深度偏差为 $-0.8\sim 0.2$ mm, 凹陷深度偏差为 1 mm, 检测精度高于 GB T 27699-2023《钢制管道内检测技术规范》标准要求。其结果如表 2:

Table 2. Excavation verification table

表 2. 开挖验证表

数据来源	缺陷类型	峰值深度(%wt)	长度(mm)	宽度(mm)
内检测	金属损失	29.7	17	15
实测	金属损失	30.0	20	20
内检测	金属损失	31.3	19	15
实测	金属损失	18.4	20	10
内检测	凹陷	2.1	178	90
实测	凹陷	2.2	180	85
内检测	金属损失	28.1	15	15
实测	金属损失	29.2	20	20

验证结果表明: 差分涡流内检测技术可检出管道内部缺陷, 并且对内部缺陷的量化精度高于国标要求, 能够为管道安全运行提供准确的数据支撑。

3.4. 评价

该管道材质为 X42, 管径为 219 mm, 设计压力为 6.3 MPa, 主要设计壁厚为 5.6/6.4 mm, 分别对两种壁厚管节上的缺陷进行剩余强度评价, 经评价, 本次涡流检测缺陷目前均处于低风险状态。评价结果见图 6、图 7。

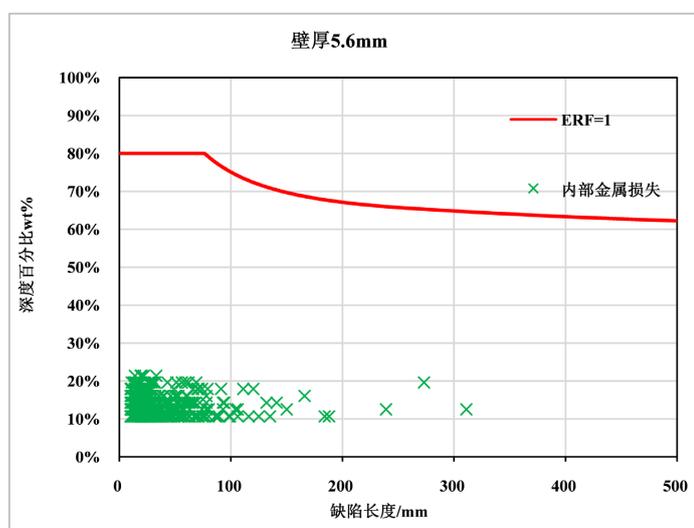


Figure 6. Remaining strength assessment of internal metal loss—5.6 mm wall thickness

图 6. 缺陷剩余强度评价——壁厚 5.6 mm

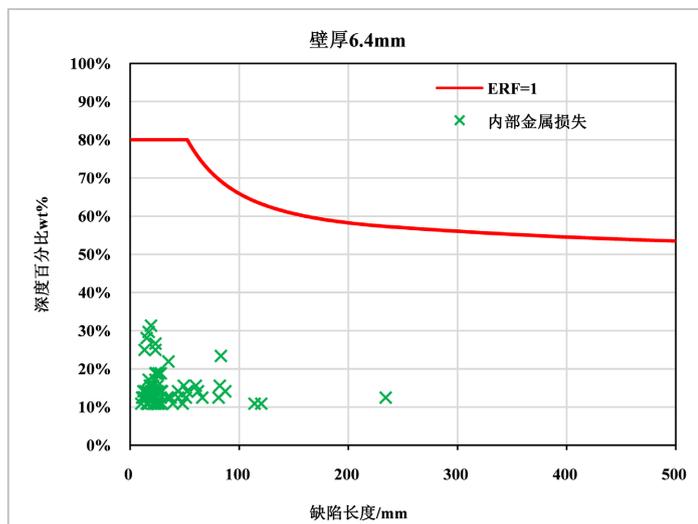


Figure 7. Remaining strength assessment of internal metal loss—6.4 mm wall thickness
图 7. 缺陷剩余强度评价——壁厚 6.4 mm

该管线从 2014 年 11 月投产以来, 共计运行 9.2 年, 假设管道内部环境自投产以来未发生较大变化、内部腐蚀是活性的并且从管道开始投产时已开始线性增长, 计算出内部金属损失的最大增长速率为 0.22 mm/a, 依据 SY/T 6151-2022 《钢制管道金属损失缺陷评价方法》对该管道的涡流检测缺陷进行剩余寿命计算, 根据评价结果, 缺陷最低剩余寿命为 14.3 年, 整条管道剩余寿命预测结果见图 8。

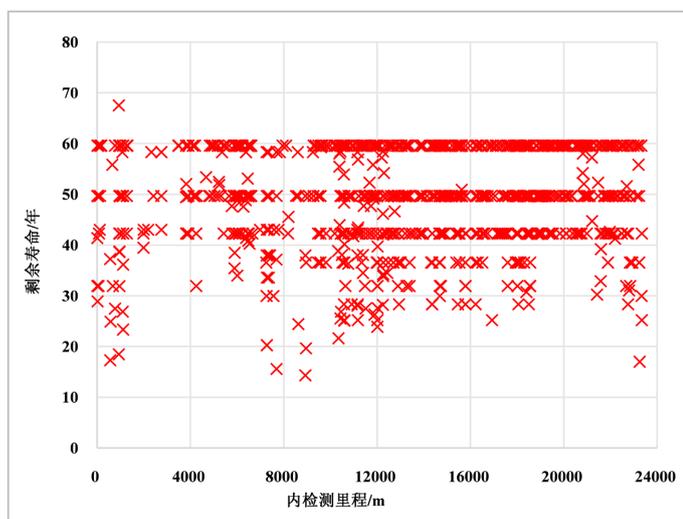


Figure 8. Remaining life prediction results from internal metal loss
图 8. 内部金属损失剩余寿命预测结果

4. 结束语

针对低压低流量管道, 使用传统的漏磁、超声内检测技术存在较大挑战, 甚至有些管段自建成以来从未进行清管。为了保障管道安全运行, 首次采用差分涡流检测器对该管道进行内检测, 经过定制化设计, 检测器在 0.15 MPa 压差下运行, 平均速度 0.74 m/s, 检测顺利完成, 打破了低压低流量工况不能进行内检测的难题。经开挖验证, 检测数据精度高于 GB T 27699-2023 标准要求, 通过本次内检测, 排查了管道风险, 为管道安全运行提供可靠数据支撑。

参考文献

- [1] 朱亚凯. 油气管道电磁涡流内检测技术应用研究[J]. 石化技术, 2024, 31(5): 207-209.
- [2] 常春, 杨建兴, 王蕊, 等. 电磁涡流管道内检测技术在苏里格气田的应用[J]. 石油化工应用, 2021, 40(3): 72-75.
- [3] 谢崇文, 罗欢, 李潮浪. 电磁涡流检测技术在气田集输管道内检测中的应用与分析[J]. 管道技术与设备, 2020(6): 27-30.
- [4] 诸海博, 徐晓甲, 宋华东, 等. 管道内检测技术及系统发展综述[J]. 管道技术与设备, 2018(3): 22-25.
- [5] 朱君平. 油气管道内腐蚀检测技术的现状与发展趋势[J]. 石化技术, 2019, 26(5): 299+301.
- [6] 马国. 油气管道内检测技术现状及发展趋势[J]. 石油化工安全环保技术, 2021, 37(3): 26-29+6.
- [7] 曾绪财, 张葛祥, 任涛, 等. 管道内检测研究进展及展望[J]. 交通信息与安全, 2019, 37(6): 20-31.
- [8] 李睿. 油气管道内检测技术与数据分析方法发展现状及展望[J]. 油气储运, 2024, 43(3): 241-256.
- [9] Ma, Q.P., Tian, G.Y., Zeng, Y.L., *et al.* (2021) Pipeline In-Line Inspection Method, Instrumentation and Data Management. *Sensors*, **21**, Article 3862. <https://doi.org/10.3390/s21113862>
- [10] 陈彦池. 基于差分涡流线圈的管道内表面缺陷检测探头的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2025.